

# ИССЛЕДОВАНИЯ НЕКОТОРЫХ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГЦК МЕТАЛЛОВ С РАЗЛИЧНОЙ ЭДУ ПОСЛЕ БОЛЬШИХ ДЕФОРМАЦИЙ

*Корзникова Е.А.*

*Руководитель – в.н.с., д.т.н. Мюлюков Х.Я.*

Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, г. Уфа  
helenne@yandex.ru

Известно, что для материалов с низкой энергией дефекта упаковки (ЭДУ) и соответственно с низкой подвижностью дислокаций характерно образование полосовых структур при холодной деформации сдвигом [1], [2], [3]. В случае высокой ЭДУ и высокой подвижности дислокаций при структурообразовании в процессе деформации происходит образование ячеек и увеличение угла их разориентации. Такие различия, наблюдаемые в структуре материала представляется интересным сравнить с эволюцией физических свойств в материалах с различной ЭДУ. Также была поставлена задача сравнить термостабильность металлов с различной величиной ЭДУ после ИПД.

В качестве материала для исследования выбрали 3 ГЦК металла с различной ЭДУ: Ag 99,99 %; Cu 99,99 %; Ni 99,998 % чистоты. Из исходных прутков с помощью электроискровой резки были вырезаны диски диаметром 8 и толщиной 0,8 мм, а затем очищены путем травления в растворе азотной кислоты и подвергались отжигу в течение 6 часов при 640 °С в атмосфере инертного газа. ИПД кручением под высоким квазигидростатическим давлением 4 ГПа до степеней деформации  $\gamma_T = 2...50$ .  $\gamma_T$  рассчитывали по формуле [4]  $\gamma_T = r\varphi/d$ , где  $r$  - радиус образца,  $d$  - его толщина и  $\varphi$  - угол поворота наковальни в радианах. Образец подвергался кручению за счет сил трения, напряжения сдвига. Отсутствие проскальзывания контролировали путем измерения крутящего момента, который пересчитывали в напряжение сдвига  $\tau_{\text{shear}}$ .

Основными методами анализа стали измерение остаточного электрического сопротивления четырехточечным методом после изохронных отжигов при температуре жидкого гелия. Продолжительность отжигов составляла 10 мин, интервал температур 50...350 °С с шагом 25 °С. В качестве второго метода использовали дифференциальную сканирующую калориметрию.

На рис. 1,а показана зависимость запасенной энергии от степени деформации в меди, никеле и серебре при кручении под давлением 4 ГПа.

Из рисунка видно, что в меди рост запасенной энергии имеет место только до степени деформации примерно  $\gamma \approx 11$ , и достигает насыщения уже при величине 1,2 Дж/г. Для никеля при деформации в тех же условиях

наблюдается более интенсивный рост, который продолжается до степени  $\gamma \approx 23$  и достигает величины  $E_{\text{зап}} = 2,6$  Дж/г.

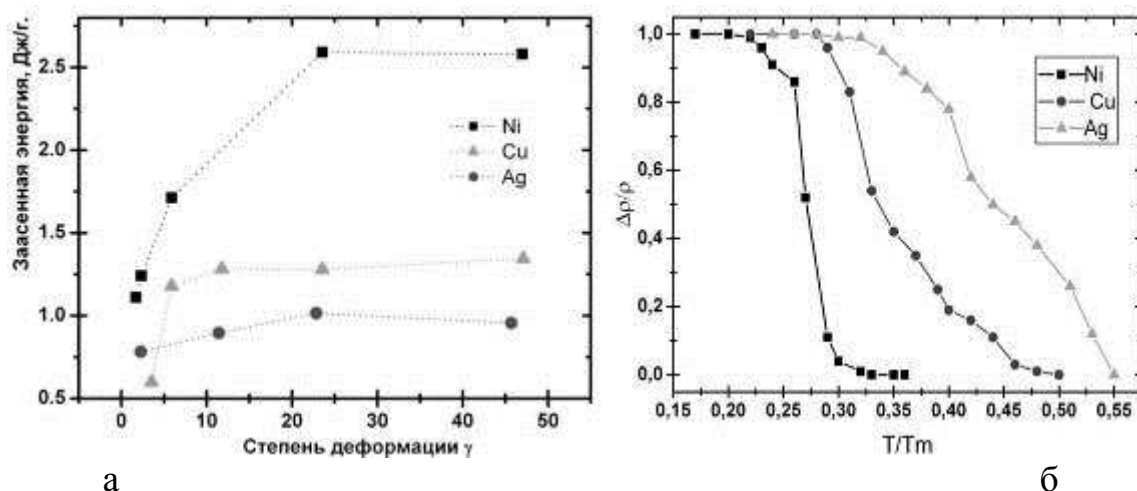


Рисунок 1. Зависимость запасенной энергии от степени деформации (а) и изменение остаточного электросопротивления после изохронных отжигов в Ag 99,99 % Cu 99,99 % и Ni 99,998 % после ИПД кручением под давлением 4 ГПа

Таким образом, во всем интервале степеней деформаций величина  $E_{\text{зап}}$  (Ni) примерно в 2 раза больше, чем  $E_{\text{зап}}$  (Cu). В случае серебра зависимость запасенной энергии от деформации  $\gamma$  также имеет 2 стадии, рост до  $\gamma \approx 23$  и на второй стадии падение примерно на 5 %. Минимальная величина  $E_{\text{зап}}$  при  $\gamma \approx 2,3$  составила примерно 0,78 Дж/г, максимальная при  $\gamma \approx 2,3$   $E_{\text{зап}} = 1,05$  Дж/г, что несколько ниже, чем в случае меди. Из рис. 1,а также видно, что в случае рассматриваемых трех металлов Ni, Cu и Ag запасенная в процессе ИПД кручением энергия тем больше чем выше ЭДУ.

Для сравнения кинетики отжига дефектов образцы тех же трех металлов Ni, Cu и Ag после деформации кручением  $\gamma \approx 48$  под давлением 4 ГПа подвергали отжигу в одинаковых условиях и проводили измерения остаточного электросопротивления. Видно, что на кривых зависимости сопротивления от температуры отжига можно выделить 3 стадии.

Для никеля первая стадия – это плавное снижение сопротивления в интервале температур  $0,2 \dots 0,23 T_m$ , вторая – резкое падение величины при температуре  $0,23 \dots 0,3 T_m$  и третья – выше  $0,3 T_m$ , когда величина электросопротивления меняется слабо. На кривой падения сопротивления для меди на первой стадии снижения сопротивления не происходит, вторая имеет место при температуре  $0,3 T_m$ , и третья стадия начинается с  $0,4 T_m$ . Аналогичный характер имеет изохрона сопротивления для Ag. Первую

стадию связывают с уменьшением внутренних напряжений, отжигом точечных дефектов, вторую – рекристаллизацией и началом роста зерен, третью – с интенсивным ростом зерен.

Тот факт, что в Cu и Ag первая стадия не связана с каким-либо падением электросопротивления, говорит о том, что релаксация внутренних напряжений и аннигиляция точечных дефектов в этих металлах происходит уже при комнатной температуре. Смещение кривых падения сопротивления в сторону более высоких гомологических температур для Cu и Ag можно объяснить более низким уровнем энергии дефекта упаковки.

Таким образом, на примере анализа электросопротивления трех металлов – Ni, Cu и Ag было установлено, что гомологическая температура отжига дефектов снижается, интервал температур отжига дефектов уменьшается, запасенная энергия увеличивается с ростом ЭДУ.

Используемые литературные источники:

1. Валиев Р.З., Александров И.В. Объемные наноструктурные металлические материалы. — Москва: ИКЦ "Академкнига", 2007.
2. Утяшев Ф.З. Современные методы интенсивной пластической деформации. — Уфа : УГАТУ, 2008.
3. Смирнова Н.А., Левит В.И., Пилюгин В.И., Кузнецов Р.И., Давыдова Л.С., Сазонов В.А.. Эволюция структуры ГЦК монокристаллов при больших пластических деформациях // Физика металлов и металловедение. — 1986 г.